

旋转视频中特征点的迭代筛选与光流估计匹配研究

王斌锐, 徐峯, 金英连, 吴善强

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 转动抖动补偿是视频稳像的难点, 针对转动抖动补偿中的关键技术特征点的筛选与匹配展开研究。建立了图像的6参数仿射模型; 推导得到估计有意运动参数的超定方程; 采用最小二乘迭代算法来去除绝对误差和(SAD)算法误判的特征点; 采用金字塔(LK)光流算法来对旋转视频进行特征点匹配。编程实现算法; 用特征窗口梯度矩阵法(KLT)提取特征后, 分别用SAD算法和LK光流算法进行匹配, 求解得到旋转变换阵参数误差, 分析、比较并图示了误差原因; 利用Kalman滤波去除无意运动; 对含转动抖动的视频进行稳像补偿。在自主移动机器人平台上开展了实验。结果表明LK光流算法相比SAD算法对旋转视频的特征点匹配误差小, 结合Kalman滤波可有效补偿转动抖动, 将最大 8.37° 的转动抖动稳像到 3.68° 以下。

关键词: 信息处理技术; 特征点; 光流; 抖动补偿; 机器人

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2012)11-1329-06

Iterative Filter and Optical Flow Estimation Matching of Feature Points in Rotary Jitter Compensation

WANG Bin-rui, XU Yin, JIN Ying-lian, WU Shan-qiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Rotary jitter compensation is a difficulty in video image stabilization. The feature point matching and inaccurate point filtering were studied. An affine model with 6 parameters was established for moving images, and an over-determined equation to estimate motion parameters was derived. The least squares iterative algorithm was used to remove error feature points judged by sum of absolute difference (SAD) matching algorithm. A pyramid-style Lucas-Kanade (LK) algorithm based on optical flow was adopted for feature point matching of rotary video. All algorithms were programmed. After detecting feature points by using the gradient matrix of the feature window (KLT) method, SAD and LK algorithms were used to match feature points respectively, and the rotation matrix parameter errors were obtained and compared. The reasons of matching error were analyzed. Kalman filter was used to smooth rotation parameters. All algorithms were implemented on an autonomous robot. The experiment results show that LK can get less matching errors than SAD for rotation jitter, and Kalman filter makes the maximum 8.37° rotation jitter less than 3.68° , thus it can compensate the rotary video effectively.

Key words: information processing; feature point; optical flow; jitter compensation; robot

0 引言

路面不平及左右轮不对称等会导致移动机器人视觉中存在转动抖动,会影响机器人的作业精度,尤其是在战场环境中。现有的稳像算法主要基于块运动、特征跟踪和变换域等方法^[1]。基于块运动算法处理旋转抖动比较困难^[2]。基于变换域的方法需对图像进行变换处理,增加了计算量^[3]。基于特征跟踪的算法对旋转抖动比较适用。特征点的准确提取和匹配是目前研究重点。文献[4-5]提出利用尺度不变(SIFT)特征匹配进行数字稳像,但特征提取过程复杂,计算量大。文献[6]研究车载摄像机稳像系统,仅利用道路上虚实线作为参考特征进行运动估计,适用范围有限。文献[7-8]利用块匹配中的平移扫描方法进行匹配。文献[9]提出了光流方程来估计全局运动。

本文采用特征窗口梯度矩阵法(KLT)^[10]提取特征点;设计了绝对误差和(SAD)法匹配特征点和最小二乘迭代法对误判的特征点进行筛选;而后建立基于金字塔(LK)光流算法的光流估计特征点匹配方法;编程实现运动参数估计和视频抖动补偿算法;对比分析 SAD 算法和 LK 光流算法对旋转变换矩阵参数的估计误差;并用 Kalman 滤波算法对旋转视频进行补偿;最后在自主移动机器人上开展实验,得到转动抖动补偿后视频,验证本文方法。

1 特征点筛选和光流估计匹配

1.1 基于最小二乘迭代法特征点筛选算法

本文采用含 6 参数的图像运动仿射变换模型。根据坐标变换,相邻两帧图像间运动模型为

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}$ 为旋转变换阵; $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}$ 为平移变换阵; $(x_i \ y_i)^T$ 为第 $j-1$ 帧图像中第 i 个特征点坐标, $(\hat{x} \ \hat{y})^T$ 为第 j 帧图像中与 $(x_i \ y_i)^T$ 拟匹配特征点坐标, $i=1,2,\dots,k, j=2,3,\dots, \mathbf{A}$ 和 \mathbf{T} 既包含有意运动,也包含无意运动(如抖动)。

由(1)式可得,基于 k 对相邻帧间匹配的特征点坐标的有意运动参数估计方程为

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_k & y_k & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 & \hat{y}_1 \\ \hat{x}_2 & \hat{y}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \hat{x}_k & \hat{y}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_2 & a_4 \\ a_5 & a_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_1 & \hat{a}_3 \\ \hat{a}_2 & \hat{a}_4 \\ \hat{a}_5 & \hat{a}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N(0, \sigma_z^{\text{obs}}) & N(0, \sigma_r^{\text{obs}}) \\ N(0, \sigma_r^{\text{obs}}) & N(0, \sigma_z^{\text{obs}}) \\ N(0, \sigma_x^{\text{obs}}) & N(0, \sigma_y^{\text{obs}}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\hat{a}_1 \sim \hat{a}_6$ 为有意运动参数的估计; $N(0, \sigma_x)$, $N(0, \sigma_y)$, $N(0, \sigma_z)$, $N(0, \sigma_r)$ 为相互独立的白噪声,表示方差分别为 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_r$ 的图像的平动和转动抖动的观测值。

由于机器人视觉图像复杂,为保证算法鲁棒性好, k 往往远大于 3。(2)式为超代数方程,可用最小二乘法求解。

(2)式的建立过程:先采用 KLT 算法获得第 $j-1$ 帧图像中的 k 个特征点;而后通过在第 j 帧图像中,在以特征点坐标为中心的 7×7 范围内进行扫描搜索;通过求解相邻两帧对应像素点的灰度 SAD 的最小值来进行特征点匹配。

由于机器人视觉图像中作业点的自身运动及环境变化等影响, k 对匹配特征点中往往会存在误判点。为此,本文设计迭代法来对特征点对进行筛选,算法流程如图 1 所示。

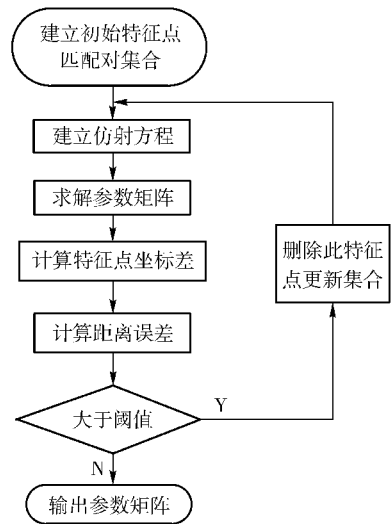


图 1 特征点迭代筛选算法

Fig. 1 Filter algorithm for feature points

实际筛选中,还添加了强制约束条件:特征点匹配对集合中剩余特征点对数不能小于 3。

1.2 LK 光流算法特征点匹配

LK 光流算法是基于两帧差分的光流估计算法,要求满足亮度恒定、时间连续(运动量小)、空间一致等假设。移动机器人对接作业中,作业点区域内的视频满足上述要求。此时,图像约束方程为

$$I(x \ y \ t) = I(x + \delta x \ y + \delta y \ t + \delta t), \quad (3)$$

式中： $I(x, y, t)$ 为 t 时刻 (x, y) 点的像素； $I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ 为 $t + \delta t$ 时刻 (x, y) 点运动到 $(x + \delta x, y + \delta y)$ 点的像素。

将(3)式泰勒级数展开为

$$I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + \dots \text{(略去高阶项)}. \quad (4)$$

忽略高阶级数, 可得

$$I_x u + I_y v + I_t = 0, \quad (5)$$

式中： $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$ 分别为图像在 x, y 方向的导数；

$I_t = \frac{\partial I}{\partial t}, u = \frac{\delta x}{\delta t}, v = \frac{\delta y}{\delta t}$ 分别为 x, y 方向的差分。

(5)式对于任意一个像素都含有两个未知量, 对于单个像素, 不能进行二维运动定解。基于 LK 光流算法中的空间一致假设, 可建立邻域像素的矩阵方程来求解中心像素的运动。本文用当前像素的 5×5 邻域内的像素值来计算中心像素(特征点)的运动, 可建立求解方程

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{b}, \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} I_x(p_1) & I_y(p_1) \\ I_x(p_2) & I_y(p_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(p_{25}) & I_y(p_{25}) \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} I_t(p_1) \\ I_t(p_2) \\ \vdots \\ I_t(p_{25}) \end{bmatrix}, p_1, \dots,$$

p_{25} 代表 5×5 邻域内 25 个像素点。

当机器人移动速度较快, 引起视频大而不连贯运动时, 需用一个大的窗口来捕获大的运动。而大窗口与运动连贯假设相违背。所以本文利用图像 LK 光流算法来解决此问题。在图像金字塔的最高层计算光流, 用得到的运动估计结果作为下一层金字塔的起点, 迭代上述过程直至到达金字塔的最底层。

2 参数估计和抖动补偿实验研究

(1)式中既含有平动, 也含有旋转。但旋转对图像影响较大。本文主要针对旋转视频, 估计的运动参数是旋转变换阵的 4 个参数。

利用 KLT 方法提取特征点后, 分别用 SAD 算法和 LK 光流算法进行匹配, 并估计运动参数。

2.1 SAD 算法运动参数估计

采用 SAD 局部扫描法和最小二乘迭代法得到相邻帧的特征匹配点, 据此求出了旋转变换阵 \mathbf{A} , 并

与实际值比较, 得到旋转变换阵参数的估计误差如图 2 所示。

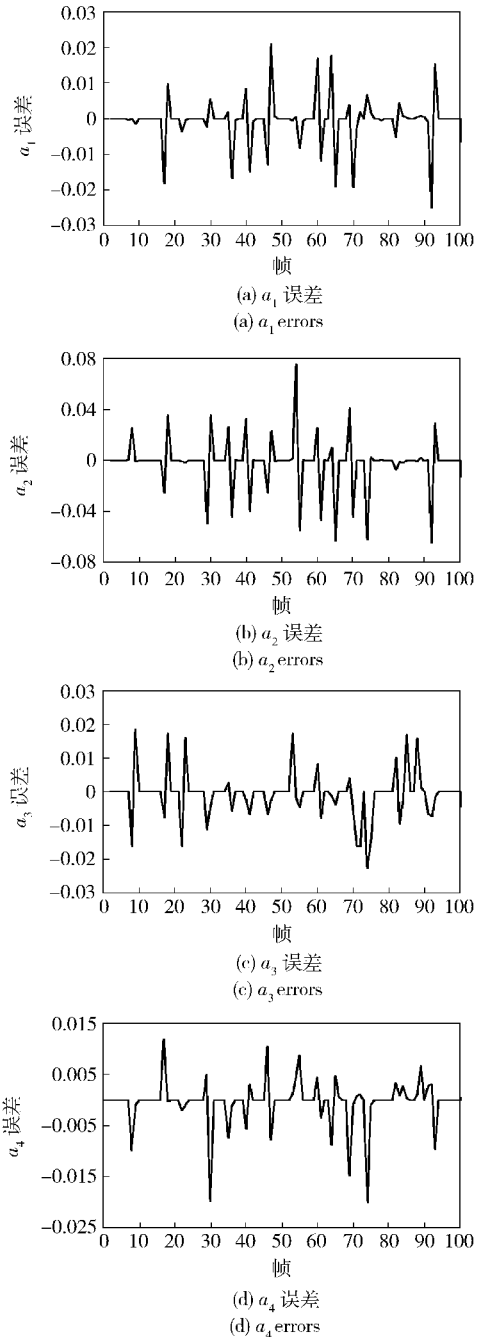


图 2 SAD 算法参数求解误差

Fig. 2 Errors of rotation parameters by using SAD

由图 2 可见, 4 个参数误差都比较大, $a_1 \sim a_4$ 的均方差分别为 0.006 129、0.008 717、0.006 379、0.004 031。分析原因: 采用 SAD 局部扫描法处理旋转视频时, 得到错误的特征匹配点较多。迭代筛选虽去除了很多误判点, 但同时也导致可用特征匹配点对减少, (2) 式求解误差大。图 3 为造成错误匹配点较多的原因。

图 3(b) 为视频在没有发生抖动时特征点与模板重合;当视频发生平移时,如图 3(a) 为通过模板在搜索范围内的平移扫描,可找到与模板完全重合

的特征点;当视频发生旋转时,模板的平移扫描不能使特征点完全重合,容易造成找到的特征点在错误位置,如图 3(c) 中三角形所示。

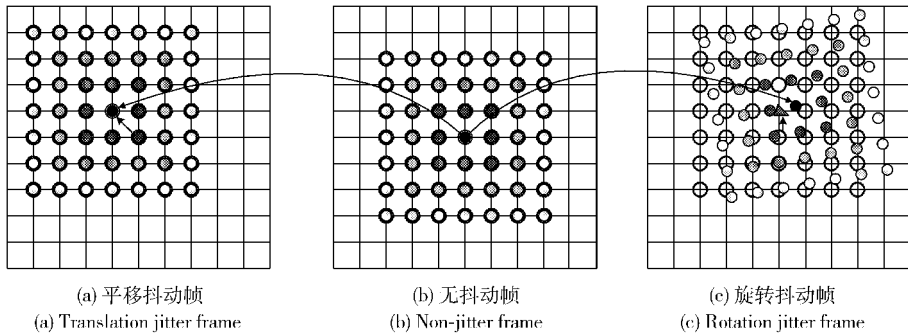


图 3 图像平移和旋转中特征点匹配示意图

Fig. 3 Sketch of feature point matching for displacement and rotation video

2.2 LK 光流算法运动参数估计

由于 SAD 算法对旋转参数求解误差大,本文运

用金字塔 LK 光流算法进行匹配,得到的参数误差如图 4 所示。

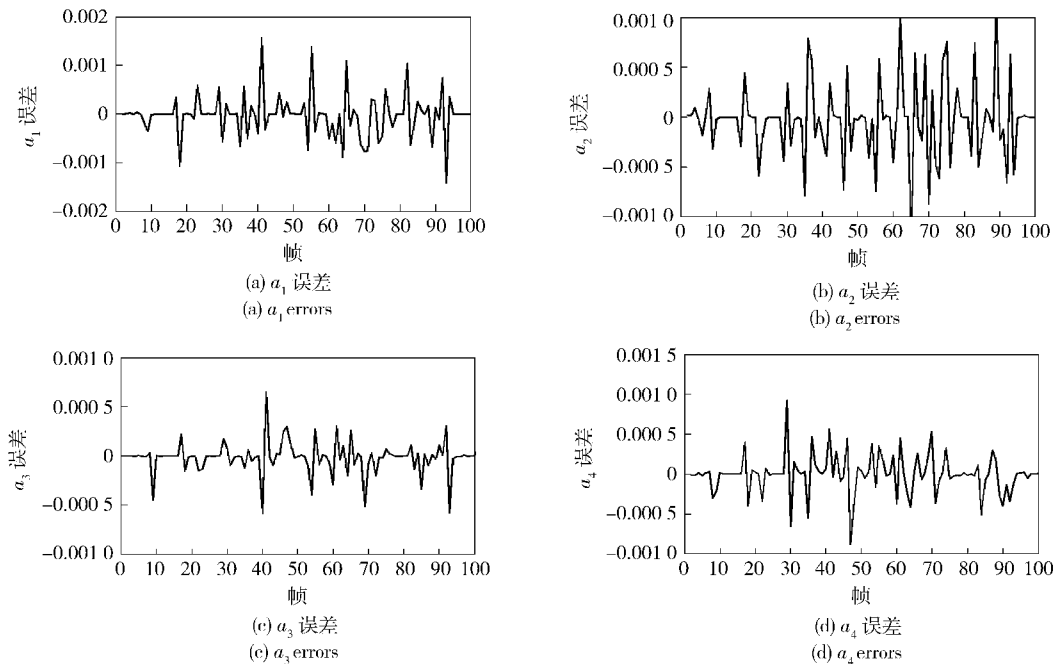


图 4 LK 光流算法参数求解误差

Fig. 4 Errors of rotation parameters by using LK

由图 4 可见,LK 光流算法得到的参数的误差相比 SAD 算法小了很多。 $a_1 \sim a_4$ 的均方差分别为 0.000 443、0.001 749、0.001 754、0.000 387。以点 (300 200) 为例,利用 SAD 算法,点的匹配误差为 (16.7 15.2);而利用 LK 光流算法,点的误差为 (-0.21 -0.12)。由此可见,LK 光流算法很好的估计了旋转视频的运动参数。

2.3 旋转视频补偿实验

摄像头放置在自主机器人 Voryager II a (中国)

上,视频采集频率 20 帧/s,实验时间 5 s。稳像中先将彩色图像预处理为 8 位灰度图像。机器人对接作业过程为:Voryager 机器人左右轮上设置有不规则凸起(用于模拟路面不平,并导致机器人视觉抖动中旋转成分为主),在小方格石砖路面上行走,跟踪 Dr. Robot(加拿大)机器人,并将工件插入 Dr. Robot 机器人上的作业点处。

利用 LK 光流算法估计运动参数后,通过 Kalman 滤波滤去 (2) 式中的噪声,可得结果如图 5 所示。

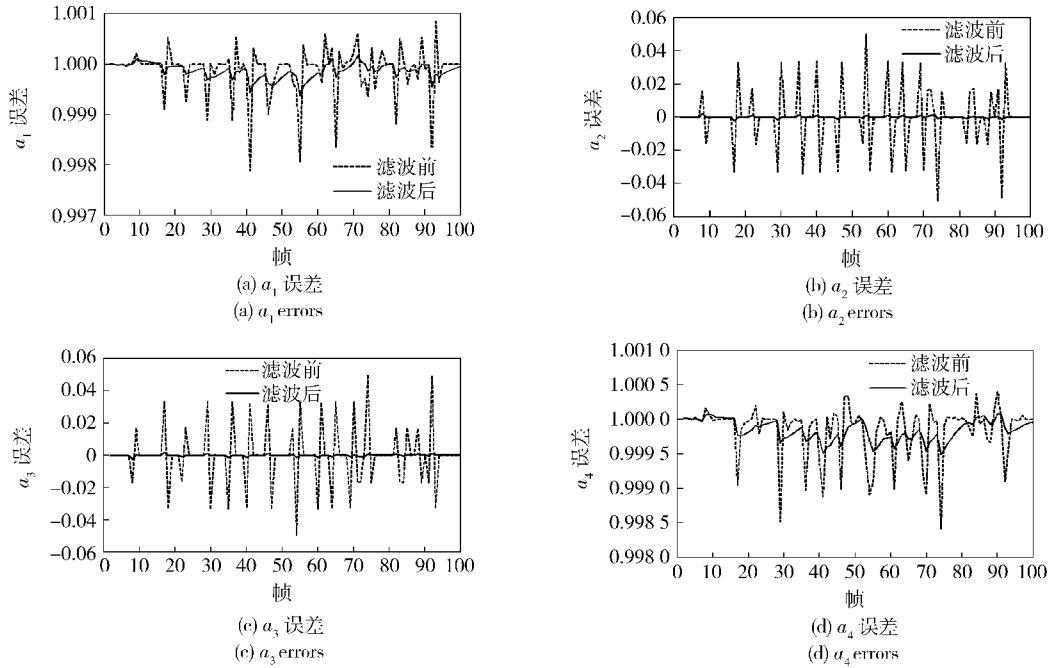


图 5 参数矩阵 A 滤波结果
Fig. 5 Kalman filtering results for matrix A

由图 5 可见,经过 Kalman 滤波后矩阵 A 中的参数相比滤波前平滑许多。

本文图像建模中,坐标原点为图像的左上角,所以本文估计的旋转是绕图像左上角的。通过对矩阵 A 中的参数求反三角函数可得,实验图像存在最大

为 8.37° 的转动抖动。由于有意运动与抖动混合在一起,滤波方法不能完全消除抖动。但滤波后,转动抖动减小到最大为 3.68° 。

补偿前视频序列如图 6(a) 所示,稳像补偿后的视频序列如图 6(b) 所示。

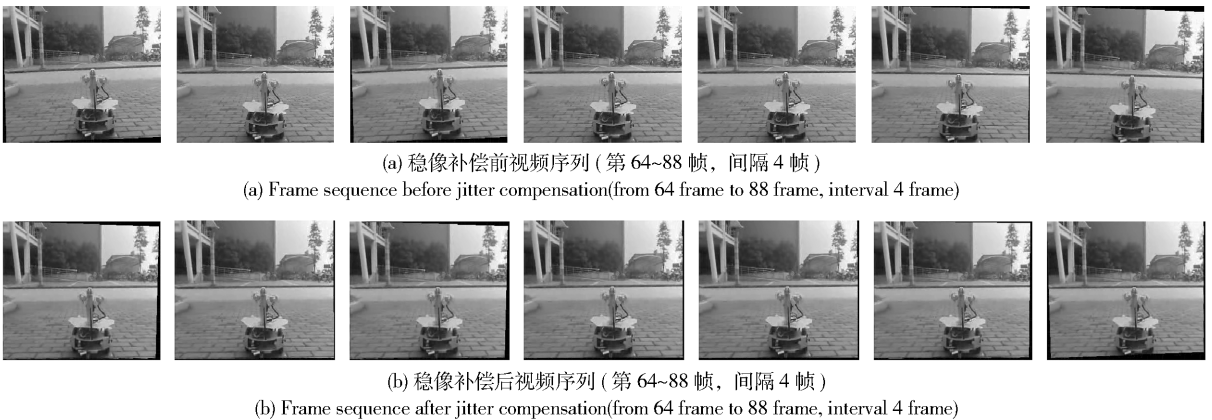


图 6 视频序列对比

Fig. 6 Effect after jitter compensation

从图 6(a) 中图像底端的砖缝可见,视频序列发生了明显转动抖动。从图 6(b) 中图像底端的砖缝可见,经过稳像补偿后,转动抖动明显减少。将多帧图像叠加起来的稳像补偿效果如图 7 所示。

图 7(a) 明显比图 7(b) 模糊,更直观地说明本文稳像补偿算法对旋转视频的抖动有很好的效果。

3 结论

- 1) 最小二乘迭代算法能滤除掉误差较大的匹配特征点对,利于提高旋转参数估计精度。
- 2) SAD 算法对旋转视频特征点匹配求解误差较大。



(a) 稳像前的图像帧叠加

(a) Superposition of frames before jitter compensation



(b) 稳像后的图像帧叠加

(b) Superposition of frames after jitter compensation

图 7 图像帧叠加前后效果

Fig.7 Effect of frame superposition

3) LK 光流算法能获得好的旋转视频特征点匹配效果。

4) Kalman 滤波可很好的滤除运动参数中的无意转动抖动。

本文设计的基于 LK 光流算法和 Kalman 滤波的视频转动抖动补偿方法有效,可增加视频的平稳度,且算法简明,易于实现快速响应。

参考文献 (References)

- [1] 孟龙,林行刚,王贵锦,等. 视频抖动矫正系统中的运动滤波 [J]. 清华大学学报,2005, 45(1):41-43.
MENG Long, LIN Xing-gang, WANG Gui-jin, et al. Motion filter for video stabilizing systems [J]. Journal of Tsinghua University,

2005, 45(1):41-43. (in Chinese)

- [2] Onishi H, Suzuki H, Chamberlain S. Detection of rotation and parallel translation using hough and Fourier transforms [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1996, 3: 827-830.
- [3] 尹德森,赵跃进. 基于角点跟踪的数字稳像算法 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5):920-923.
YIN De-sen, ZHAO Yue-jin. Digital image stabilization algorithm based on corner tracking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5):920-923. (in Chinese)
- [4] Battiato S, Gallo G, Puglisi G. SIFT features tracking for video stabilization [C] // 14th International Conference on Image Analysis and Processing. Modena: IEEE, 2007: 825-830.
- [5] Chung C Y, Chen H H. Feature-based full-frame image stabilization [C] // Ninth IEEE International Symposium on Multimedia. Taichung: IEEE, 2007:100-106.
- [6] Liang Y M, Tyan H R, Chang Shyang-lih, et al. Video stabilization for a camcorder mounted on a moving vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(6): 1636-1648.
- [7] 俞能海,陈豪,刘政凯. 基于块金字塔的快速块匹配算法 [J]. 电路与系统学报, 2003, 8(3):54-57.
YU Neng-hai, CHEN Hao, LIU Zheng-kai. A fast block matching algorithm based on block sum pyramid [J]. Journal of Circuits and Systems, 2003, 8(3):54-57. (in Chinese)
- [8] Essannouni F, Thami R O H, Salam A, et al. A new fast full search block matching algorithm using frequency domain [C] // The Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications. Sydney: IEEE, 2005: 559-562.
- [9] Cai J H, Walker R. Robust motion estimation for camcorders mounted in mobile platforms [C] // The Conference of the Australian Pattern Recognition Society on Digital Image Computing: Techniques and Applications. Canberra: IEEE, 2008:491-496.
- [10] 徐崑,王斌锐,金英连. 基于特征匹配和卡尔曼滤波的机器人视觉稳像 [J]. 计算机工程, 2011, 37(20):194-196, 199.
XU Yin, WANG Bin-rui, JIN Ying-lian. Robot vision image stabilization based on feature matching and Kalman filtering [J]. Computer Engineering, 2011, 37(20): 194-196, 199. (in Chinese)